

TÓPICOS AVANÇADOS DE CONTROLE

IMPLEMENTAÇÃO DE LÓGICA FUZZY EM UM ROBÔ DA CATEGORIA SEGUIDOR DE LINHA

JEAN FREITAS

LARISA BARRETO CLEMENTE ALVES

MARLLON BATISTA DA CONCEIÇÃO

Campos dos Goytacazes - RJ

2026

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1 LÓGICA FUZZY.....	4
2.1.1 CONJUNTOS FUZZY.....	4
2.1.2 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS.....	4
2.1.3 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.....	5
2.1.4 OPERAÇÕES FUZZY.....	5
2.1.5 SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY.....	5
2.2 CONTROLADOR PD.....	6
3. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO.....	7
3.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA.....	7
3.2 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS.....	7
3.3 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIAS.....	8
3.4 BASE DE REGRAS.....	10
4. RESULTADO.....	11
REFERÊNCIAS.....	12

1. INTRODUÇÃO

A lógica fuzzy é uma extensão da lógica booleana, introduzida pelo Dr. Lofti Zadeh da Universidade da Califórnia / Berkeley no ano 1965. Foi desenvolvida para expressar o conceito de verdade parcial, de maneira que se possam determinar valores entre o limite “completamente verdadeiro” e “completamente falso”. Isto significa que um valor lógico difuso é um valor qualquer no intervalo de 0 a 1. A lógica fuzzy torna-se importante na medida em que o mundo em que vivemos não é constituído por fatos absolutamente verdadeiros ou falsos.

A lógica fuzzy tem a capacidade de incorporar a forma humana de pensar em sistemas de controle. Dessa forma, o controlador fuzzy comporta-se conforme o raciocínio que o especialista utiliza para inferir as regras, baseadas nas informações que eles já conhecem.

No relatório iremos abordar sobre a implementação da lógica fuzzy em um robô seguidor de linha, onde usaremos controlador fuzzy para ajustar dinamicamente os ganhos K_p e K_d do controlador PD com base em variáveis como:

- Erro (E): diferença entre a posição ideal da linha e a posição atual.
- Derivada do erro (dE): variação do erro (velocidade com que o robô está saindo da linha).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 LÓGICA FUZZY

A lógica fuzzy surge como uma extensão da lógica booleana tradicional, aquela do verdadeiro ou falso, do zero ou um. Como na vida real, as coisas raramente são tão preto no branco. Muitas vezes nos deparamos com situações ambíguas, com graus de verdade. É exatamente aí que a lógica fuzzy entra em cena. Em vez de trabalhar com valores binários, ela opera com o conceito de grau de pertinência. Isso significa que um elemento pode pertencer a um conjunto em diferentes medidas, variando de 0 (não pertence) a 1 (pertence totalmente), passando por todos os valores intermediários.

- Alguns aspectos importantes da lógica fuzzy:

2.1.1 CONJUNTOS FUZZY

Os conjuntos fuzzy são a base da lógica fuzzy. Diferentemente dos conjuntos clássicos, onde um elemento ou pertence ou não pertence, nos conjuntos fuzzy, cada elemento possui um grau de pertinência a esse conjunto, representado por um valor entre 0 e 1. Essa ideia nos permite lidar com a imprecisão e a subjetividade inerentes a muitos conceitos do mundo real, como "quente", "rápido" ou "alto".

2.1.2 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

Em vez de usar valores numéricos diretos, a lógica fuzzy emprega variáveis linguísticas. Uma variável linguística é uma variável cujos valores são palavras ou frases em linguagem natural, chamadas termos linguísticos. Por exemplo, a variável "temperatura" pode ter termos linguísticos como "muito fria", "fria", "morna", "quente" e "muito quente". Cada um desses termos linguísticos é associado a um conjunto fuzzy que define o seu significado. Isso torna a comunicação e a representação do conhecimento mais próximas da forma como os humanos pensam e se expressam.

2.1.3 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

As funções de pertinência são a ferramenta matemática que define o grau em que cada elemento do universo de discurso (o conjunto de todos os valores possíveis para uma variável) pertence a um conjunto fuzzy específico. Essa função mapeia cada valor do universo de discurso para um valor entre 0 e 1. Existem diversos tipos de funções de pertinência, como triangulares, trapezoidais, gaussianas, entre outras, cada uma adequada para representar diferentes tipos de imprecisão e subjetividade. A escolha da função de pertinência correta é crucial para modelar adequadamente um conceito fuzzy.

2.1.4 OPERAÇÕES FUZZY

Assim como na lógica clássica temos as operações AND, OR e NOT, na lógica fuzzy existem as operações fuzzy que estendem esses conceitos para trabalhar com graus de pertinência. Por exemplo, a operação AND fuzzy (também conhecida como t-norma) geralmente seleciona o mínimo dos graus de pertinência dos operandos, enquanto a operação OR fuzzy (também conhecida como t-conorma ou s-norma) frequentemente seleciona o máximo. A operação NOT fuzzy geralmente é definida como 1 menos o grau de pertinência. Essas operações permitem combinar e manipular informações fuzzy para realizar inferências.

2.1.5 SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY

Os sistemas de inferência fuzzy são o "cérebro" das aplicações de lógica fuzzy. Eles utilizam um conjunto de regras "SE-ENTÃO" (regras de produção) para tomar decisões ou gerar saídas com base em entradas fuzzy. O processo geralmente envolve as seguintes etapas:

- Fuzzificação: As entradas numéricas são convertidas em conjuntos fuzzy usando as funções de pertinência apropriadas.
- Inferência: As regras fuzzy são aplicadas aos conjuntos fuzzy de entrada para determinar o grau de ativação de cada regra e gerar conjuntos fuzzy de saída para cada regra.
- Agregação: Os conjuntos fuzzy de saída de todas as regras ativadas são combinados em um único conjunto fuzzy de saída.

- Defuzzificação: O conjunto fuzzy de saída é convertido em um valor numérico nítido que pode ser usado para controle ou tomada de decisão.

2.2 CONTROLADOR PD

O controlador PD (Proporcional-Derivativo) é um tipo de controle amplamente utilizado em sistemas de automação e robótica, devido à sua simplicidade e boa resposta dinâmica. Ele é baseado em duas ações principais:

- Ação Proporcional (P):

Esta parte do controle gera uma resposta proporcional ao erro instantâneo, ou seja, à diferença entre o valor desejado (setpoint) e o valor medido (variável de processo). Quanto maior o erro, maior será a correção aplicada. O ganho proporcional determina a intensidade dessa correção.

- Ação Derivativa (D):

A ação derivativa reage à **velocidade de variação do erro**, ajudando a antecipar mudanças e reduzir oscilações no sistema. Ela age como um amortecedor, tornando a resposta mais estável e suave. O ganho derivativo define a intensidade desta ação.

A combinação das duas ações forma o controle PD, esse controle é especialmente útil em aplicações onde o erro deve ser corrigido com rapidez, mas sem causar oscilação excessiva, como em robôs seguidores de linha.

3. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

3.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA

- ENTRADAS

ERRO (E): Diferença entre a posição ideal da linha e a posição atual.

DERIVADA DO ERRO (DE): variação do erro (velocidade com que o robô está saindo da linha).

- SAÍDAS

KP : Ganho da parte proporcional do controlador;

KD : Ganho da parte derivativa do controlador;

3.2 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

- ENTRADAS

ERRO : Grande Positivo (GP), Pequeno Positivo (PP), Zero (Z), Grande Negativo (GN), Pequeno Negativo (PN).

DERIVADA DO ERRO : Grande Positivo (GP), Pequeno Positivo (PP), Zero (Z), Grande Negativo (GN), Pequeno Negativo (PN).

- SAÍDAS

KP : Diminui (D), Mantém (M), Aumenta (A).

KD: Diminui (D), Mantém (M), Aumenta (A).

3.3 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIAS

- ERRO e DERIVADA DO ERRO

Grande Positivo (GP)

$$(x - 60)/(100 - 60), \{60 < x < 100\}$$

Pequeno Positivo (PP)

$$(x - 20)/(50 - 20), \{20 < x < 50\}$$

$$(80 - x)/(80 - 50), \{50 < x < 80\}$$

Zero (Z)

$$(x + 40)/(0 + 40), \{-40 < x < 0\}$$

$$(40 - x)/(40 - 0), \{0 < x < 40\}$$

Pequeno Negativo (PN)

$$(x + 80)/(-50 + 80), \{-50 > x > -80\}$$

$$(-20 - x)/(-20 + 50), \{-50 < x < -20\}$$

Grande Negativo (GN)

$$(-60 - x)/(-60 + 100), \{-60 > x > -100\}$$

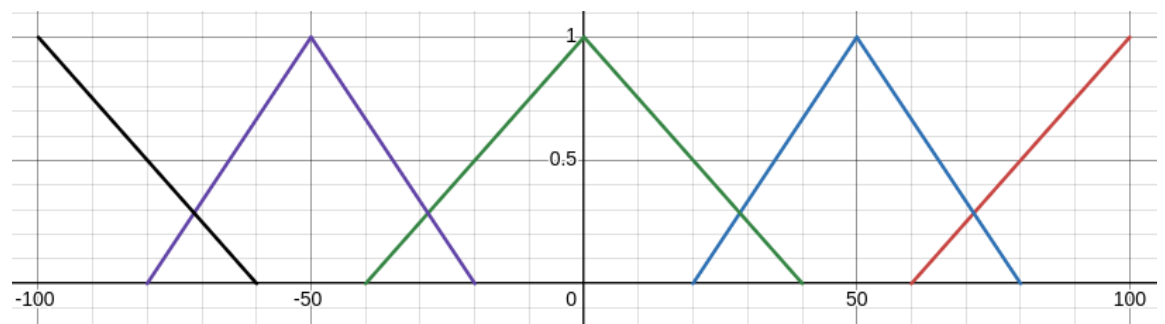


Figura 1 : Função de Pertinência da Entrada

- KP

Aumenta (A)

$$(x - 1) / (4 - 1), \{1 < x < 4\}$$

$$(7 - x) / (7 - 4), \{4 < x < 7\}$$

Mantém (M)

$$(x + 2) / (0 + 2), \{-2 < x < 0\}$$

$$(2 - x) / (2 - 0), \{0 < x < 2\}$$

Diminui (D)

$$(x + 7) / (-4 + 7), \{-7 < x < -4\}$$

$$(-1 - x) / (-1 + 4), \{-4 < x < -1\}$$

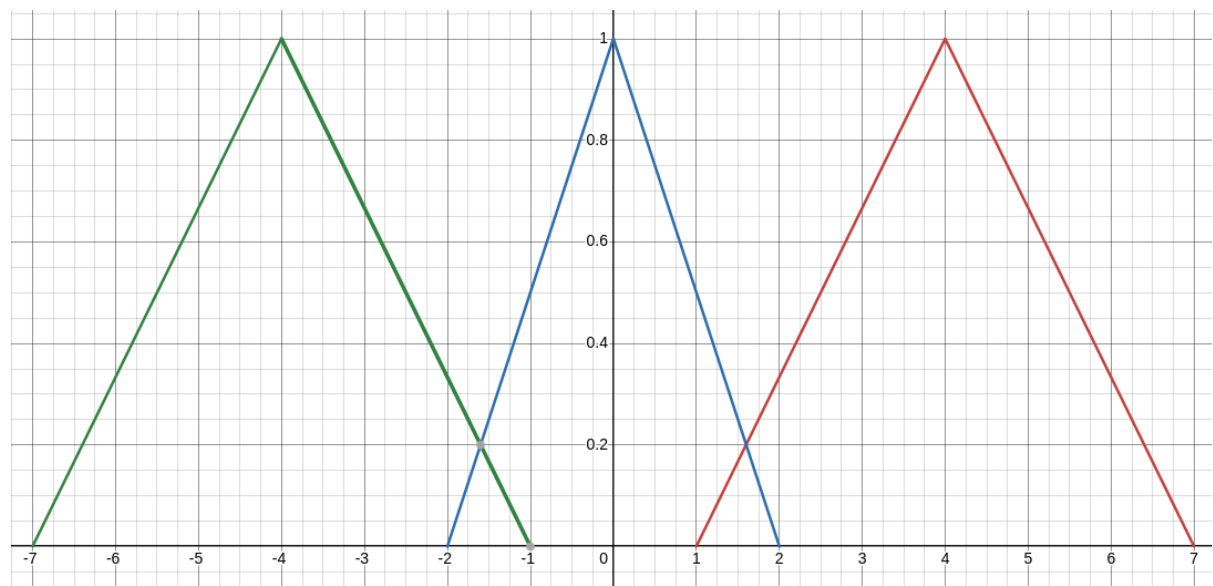


Figura 2 : Função de Pertinência do KP

- KD

Aumenta (A)

$$(x - 1) / (10 - 1), \{1 < x < 10\}$$

$$(19 - x) / (19 - 10), \{10 < x < 19\}$$

Mantém (M)

$$(x + 8) / (0 + 8), \{-8 < x < 0\}$$

$$(8 - x) / (8 - 0), \{0 < x < 8\}$$

Diminui (D)

$$(x + 19) / (-10 + 19), \{-19 < x < -10\}$$

$$(-1 - x) / (-1 + 4), \{-4 < x < -1\}$$



Figura 3 : Função de Pertinência do KD

3.4 BASE DE REGRAS

- CONJUNTO DE REGRAS PARA SAÍDA KP

Se o ERRO é GN ou GP então aumenta KP

Se o ERRO é PN ou PP então diminui KP

Se o ERRO é Z então mantém KP

- CONJUNTO DE REGRAS PARA SAÍDA KD

Se a DERIVADA DO ERRO é GN ou PN então aumenta KD

Se a DERIVADA DO ERRO é GP ou PP então diminui KD

Se a DERIVADA DO ERRO é Z então mantém KD

4. RESULTADO

Foram realizados dois testes com o robô. No primeiro, ele completou uma volta na pista utilizando apenas o controlador PD. No segundo, a volta foi feita com o controlador PD ajustado dinamicamente por um controlador Fuzzy. Durante os testes, foram coletados 20 valores de erro com uma frequência de amostragem de 0,2 segundos. A Figura 4 apresenta a comparação entre os erros registrados na primeira e na segunda volta, evidenciando a diferença no desempenho com e sem o controlador Fuzzy.

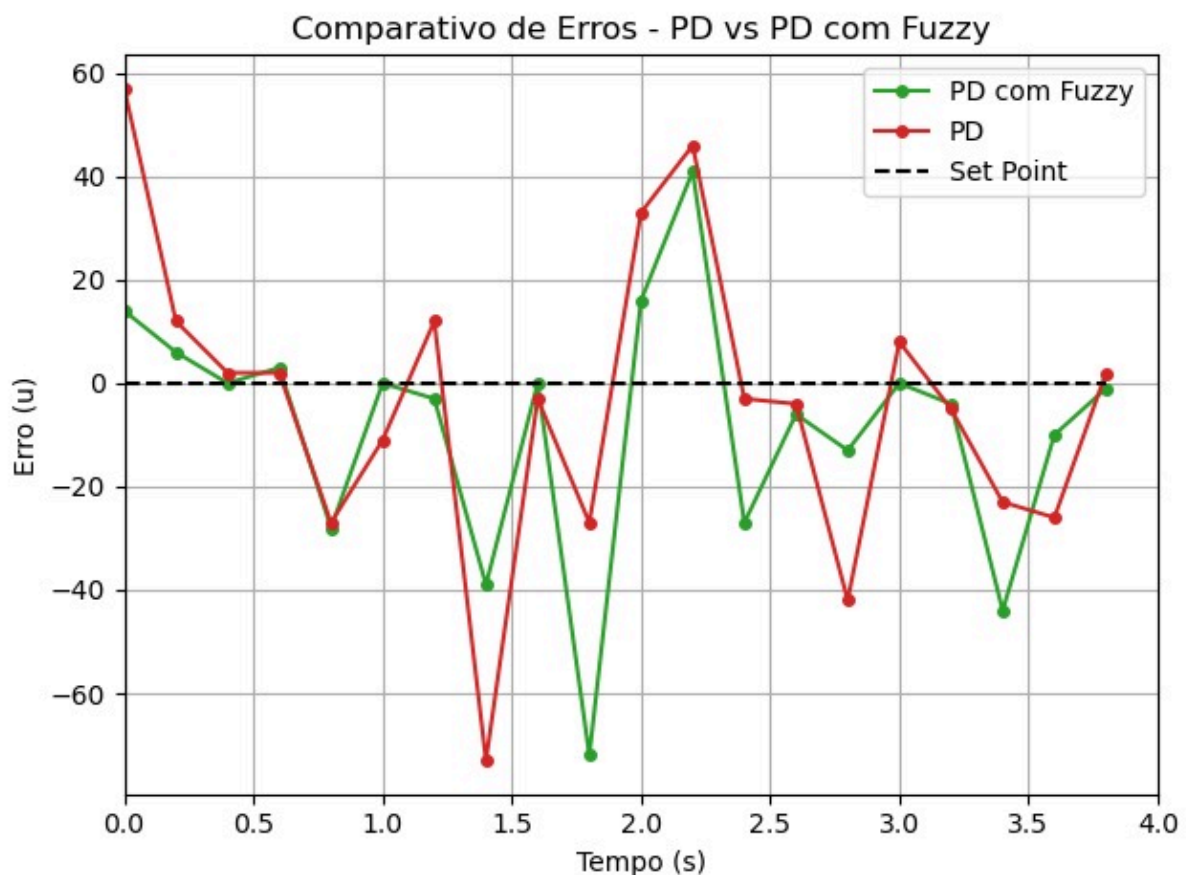


Figura 4 : Comparativo de Erros - PD vs PD com Fuzzy

No primeiro teste, o robô levou 3,95 segundos para completar a volta, com uma média do módulo do erro de 20,9. Já no segundo teste, com o ajuste Fuzzy ativo, o tempo de volta foi reduzido para 3,8 segundos, e a média do módulo do erro caiu para 16,35. Isso representa uma melhora de 0,15 segundos no tempo de percurso, além de uma maior precisão no seguimento da linha.

Para acessar o código da lógica fuzzy implementada no microcontrolador, basta visitar o repositório no GitHub: github.com/marllonbatista/FUZZY.

REFERÊNCIAS

<http://www.inf.ufsc.br/~mauro.roisenberg/ine5377/Cursos-ICA/LN-Controladores%20Fuzzy.pdf>

<http://sites.poli.usp.br/d/pmr5406/download/aula12/control fuzzy2p.pdf>

https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/32823/32823_3.PDF

<https://translate.google.com/translate?u=https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fuzzy-controller&hl=pt&sl=en&tl=pt&client=sge>